

Aus der Neurologischen Klinik der Universität Zürich
Direktor: Prof. Dr. G. Baumgartner

Arbeit unter Leitung von Dipl.-Phys. R. von der Heydt

Stereoskopische Wahrnehmung von Grössenunterschieden zwischen den Netzhautbildern

Experimentelle Untersuchung zum Nachweis eines neuen
stereoskopischen Mechanismus

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät der Universität Zürich

vorgelegt von

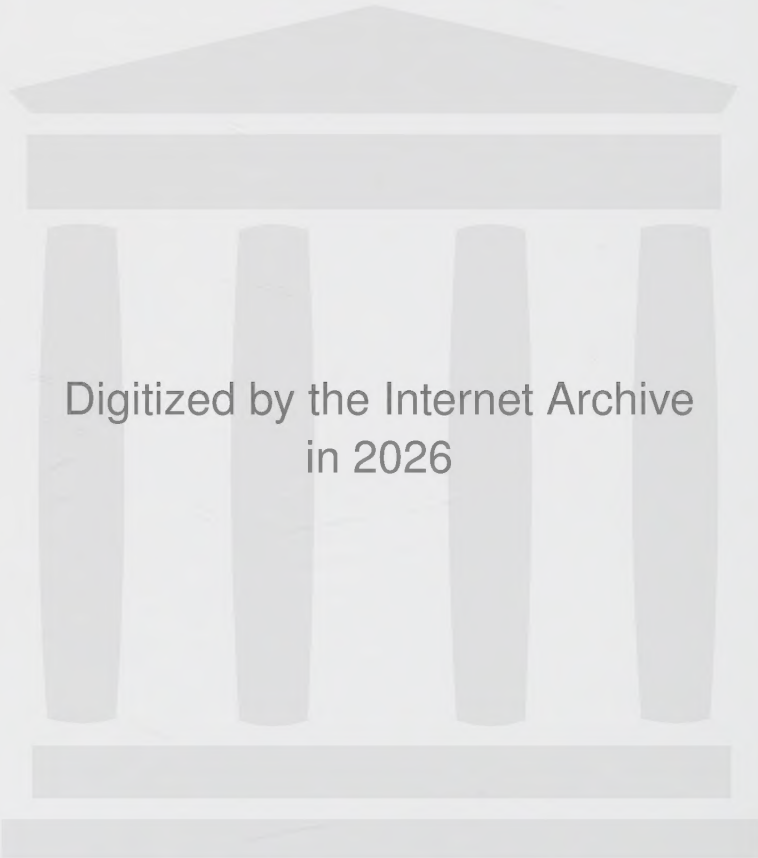
ERICH RIEDERER
von Zürich und Bad Ragaz

Genehmigt auf Antrag von Prof. Dr. G. Baumgartner



Juris Druck + Verlag Zürich

1979



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus der Neurologischen Klinik der Universität Zürich
Direktor: Prof. Dr. G. Baumgartner

Arbeit unter Leitung von Dipl.-Phys. R. von der Heydt

Stereoskopische Wahrnehmung von Grössenunterschieden zwischen den Netzhautbildern

Experimentelle Untersuchung zum Nachweis eines neuen
stereoskopischen Mechanismus

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät der Universität Zürich

vorgelegt von

ERICH RIEDERER
von Zürich und Bad Ragaz

Genehmigt auf Antrag von Prof. Dr. G. Baumgartner



Juris Druck + Verlag Zürich
1979

Statische Wahrnehmung
von Größenunterschieden
zwischen den Netzhäuten



ISBN 3 260 04617 8

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

	Seite
I. Einleitung	2
I.1. Querdisparation und Grössendisparation	2
I.2. Ausgangspunkt	3
I.3. Differenzierung zwischen zwei stereoskopischen Mechanismen	6
I.3.1. Analyse der experimentellen Situation	6
I.3.2. Ein neuer Testreiz	10
I.4. Zusammenhang zwischen Grössendisparation und Schräge	11
II. Methode	14
II.1. Versuchsaufbau	14
II.2. Versuchsablauf und Datengewinnung	17
II.3. Versuchspersonen	17
II.4. Bestimmung des Augenabstandes	18
III. Resultate	19
III.1. Vergleich der stereoskopischen Schwellen	19
III.2. Die Grösse der stereoskopischen Empfindung (Validität)	22
III.3. Grenzen der quantitativen stereoskopischen Wahrnehmung	25
IV. Diskussion	33
V. Zusammenfassung	35
VI. Literaturnachweis	37

I. Einleitung

I.1 Querdisparation und Grössendisparation

Der Mensch und einige Tierarten (nachweislich Primaten und Katzen) verfügen über binokulare Stereoskopie, d.h. die Fähigkeit, allein aus der binokularen Parallaxe eine räumliche Vorstellung von der Umwelt zu gewinnen, die auf der Retina nur 2-dimensional abgebildet wird. Seit alters (Wheatstone, 1838) macht man dafür die sog. "Querdisparation", die relative seitliche Verschiebung zwischen korrespondierenden Punkten beider Netzhautbilder, verantwortlich. Diese Vorstellung wurde in neuerer Zeit wesentlich präzisiert durch Julesz' Entdeckung, dass Querdisparation auch in einem Stereogramm aus stochastischen Punktmustern als Tiefe wahrgenommen wird ("random dot stereograms") (Julesz, 1971). Querdisparation wird also relativ früh im System detektiert, ohne dass Erkennungsprozesse in den monokularen Kanälen zur Identifikation von korrespondierenden Punkten notwendig sind. Schliesslich wurde nachgewiesen, dass es im visuellen Eingangs-Cortex von Katze und Affe Neurone gibt, die empfindlich sind auf Querdisparation (Barlow, Blakemore, und Pettigrew, 1967; Nikara, Bishop und Pettigrew, 1968; Hubel und Wiesel, 1970; Poggio und Fischer, 1977; von der Heydt, Adorjani, Hännny und Baumgartner, 1977). Diese stellen möglicherweise die gesuchten Detektoren dar.

Bereits im 19. Jahrhundert wurde bemerkt, dass ungleiche Vergrösserungen der Bilder beider Augen, wie sie z.B. durch verschiedene Korrekturlinsen hervorgerufen wird, zu einer störenden Verzerrung des wahrgenommenen Raumes führen kann (Wadsworth, 1876). Astigmatische Gläser, die eine unterschiedliche Vergrösserung entlang des horizontalen Meridians bewirken, haben eine stereoskopische Wirkung, die eine

scheinbare Drehung der frontoparallelen Ebene nach einer Seite zur Folge hat. Green (1889) und später Ogle gaben eine geometrische Erklärung dieses Effekts auf der Basis der von den Linsen erzeugten Querdissparation (vgl. Ogle 1962). Damit wird dieser Effekt der Drehung auf den bekannten Mechanismus der Tiefenwahrnehmung zurückgeführt.

Die Frage, ob nicht ein anderer Mechanismus existiert, der auf einem direkten Grössenvergleich korrespondierender Bildelemente des linken und rechten Auge beruht, wurde meines Wissens erstmals von Blakemore (1970) aufgeworfen.

I.2. Ausgangspunkt

Aufgrund von Experimenten mit Sinusgittern (Streifenmuster mit sinusförmigem Intensitätsprofil) schloss Blakemore auf einen andersartigen stereoskopischen Mechanismus, der auf dem Vergleich zweier Ortsfrequenzen* beruhe, und der speziell für die Wahrnehmung der räumlichen Orientierung von Flächen geeignet wäre. Zwei solche Sinusgitter mit verschiedenen Ortsfrequenzen wurden separat je auf die rechte und linke Retina projiziert. Beim Betrachten dieses binokularen Reizes wurde eine um die senkrechte Achse gedrehte Ebene wahrgenommen. Zwei monokulare Reize mit unterschiedlichen Informationen wurden dabei vom Beobachter als ein einziges schräges Gitter gesehen (fusioniert).

* Als Ortsfrequenz bezeichnet man, analog zur Zeitfrequenz eines Sinustones, die Anzahl Perioden pro Längeneinheit, in der Physiologie meist Anzahl Perioden pro Sehwinkel-Grad. Das Reziproke der Ortsfrequenz ist die Periodenlänge.

Vom Standpunkt der klassischen Theorie des stereoskopischen Sehens (Wheatstone) würde dieser Effekt auf die Querdissparation zurückgeführt. Betrachtet man z.B. die Streifen am linken Rand jedes Gitters als korrespondierend, so ergibt sich, wegen der verschiedenen Periodenlänge, für die übrigen Streifen eine Querdissparation, die von links nach rechts linear anwächst. Wäre z.B. die Ortsfrequenz im linken Auge grösser als im rechten, so müssten die einzelnen Streifen von links nach rechts in zunehmendem Abstand vom Beobachter erscheinen.

Blakemore betont jedoch den globalen Eindruck von Schräge, der bis zu einem gewissen Ortsfrequenzunterschied, maximal etwa 30%, erhalten bleibt, und dann abrupt zusammenbricht. Das Gitter scheint dann in verschiedene Teile zu zerfallen, die nicht mehr eine Ebene bilden. In seiner Fig. 3 gibt er verschiedene Konfigurationen wieder, die beobachtet wurden. Dann untersuchte er die Grenze der Fusion, wobei in zwei Experimenten die Ortsfrequenzen und die Ausdehnung des Gitters in weitem Bereich variiert wurde. Die Ergebnisse zeigten zumindest, dass die Grenze der Fusion eher durch das Verhältnis der Ortsfrequenzen bestimmt ist als durch die von den Gittern erzeugte kumulative Querdissparation. Aus diesem Fusionsexperiment wird gefolgert, dass der klassische Mechanismus, auf der Basis der Querdissparation, bei der stereoskopischen Wahrnehmung, unter diesen experimentellen Bedingungen, keine Rolle spiele.

Zu dieser Argumentation ist vor allem zu bemerken, dass der Mechanismus der Fusion, welcher Natur er auch sei, nicht ohne weiteres Rückschlüsse auf den Mechanismus des stereoskopischen Sehens zulässt. Aus Experimenten mit konventionellen Reizen ist seit langem bekannt, dass binokulares Tiefensehen möglich ist bei Querdissparationen die weit über den Bereich der Fusion (Panum-Bereich) hinausgehen. Allein der Bereich der quantitativen Stereoskopie (patent stereopsis) ist etwa fünfmal grösser als der Panum-Bereich (Ogle 1952). Es ist also

durchaus offen, welcher Mechanismus im Blakemore-Experiment zur Wahrnehmung der Schräge führt, und ob überhaupt ein anderer Mechanismus als der klassische existiert.

Im eigentlichen stereoskopischen Experiment vergleicht Blakemore die gesehene Schräge mit einem direkt über dem Gitter angebrachten, um die senkrechte Achse drehbaren Rechteck. Dabei stellte sich heraus, dass beim Vergleich mit dem realen Objekt, die Schräge des Gitters stets etwa um 50% unterschätzt wurde, d.h. es wurde eine zu grosse Disparität eingestellt.

Offen bleibt eine erste Frage, ob mit einem konventionellen stereoskopischen Stimulus, z.B. mit einem binokular projizierten Balken, die Schräge ebenfalls unterschätzt wird? Die gewohnte Genauigkeit der stereoskopischen Wahrnehmung beim Tiefenvergleich (Ogle 1962) liesse vermuten, dass auch die Schräge eines solchen stereoskopischen Balkens exakt geschätzt wird. Die quantitative Abweichung in Blakemore's Resultaten könnte dann als Hinweis auf einen separaten Mechanismus interpretiert werden, der eine andere Empfindlichkeit für Disparation hat. Andererseits stellt sich die Frage, ob ein stereoskopischer Mechanismus, der mit einem solchen systematischen Fehler arbeitet, neben einem genaueren Mechanismus (Wheatstone - Julesz) überhaupt eine Funktion hätte. In dieser Richtung lässt Blakemore's Arbeit keine Schlüsse zu, da die erwähnten stereoskopischen Vergleichsmessungen, obwohl ausführlich, nur an einer Versuchsperson durchgeführt wurden.

I.3. Differenzierung zwischen zwei stereoskopischen Mechanismen

I.3.1. Analyse der experimentellen Situation

In Blakemore's Experiment vergleicht die Versuchsperson das stereoskopisch gesehene Gitter mit einem direkt über dem Testreiz angebrachten Standard, einem um die senkrechte Achse drehbaren Rechteck. Die binokular wahrgenommene Schräge sollte, mit Hilfe eines Potentiometers, parallel zur Fläche des Standards eingestellt werden. Diese Aufgabe, eine Fläche parallel zur andern einzustellen, kann im Prinzip auf zwei verschiedene Arten gelöst werden.

1.) Die Versuchsperson vergleicht Tiefenunterschiede. In Abb. 1 vergleicht die Versuchsperson z.B. zuerst die Punkte A - C, dann die Punkte B - D, oder umgekehrt. Die Versuchsperson macht dabei einen Nullabgleich der Tiefe.

2.) Die Versuchsperson vergleicht die Schräge von Standard und Gitter indem in Abb. 1 z.B. die Punkte A - B mit den Punkten C - D, oder umgekehrt, verglichen werden. Anders ausgedrückt, der Beobachter vergleicht die räumliche Orientierung des Testreizes mit der des Standards.

Blakemore nimmt zwar an, dass bei Verwendung des Sinusgitters, nur die zweite Strategie angewendet wird, sein Experiment lässt jedoch beide Möglichkeiten offen.

Diese beiden möglichen Strategien, der Vergleich der Tiefen (Nullabgleich), und der Vergleich der räumlichen Orientierung, könnten zwei verschiedenen Mechanismen des stereoskopischen Sehens zugeordnet werden. Der Tiefenvergleich (Nullabgleich) wäre der klassischen Theorie der Querdissparation zuzuschreiben. Dagegen dürfte der Vergleich der räumlichen Orientierung oder Schrägevergleich, einem neuen, noch unbekannten Mechanismus

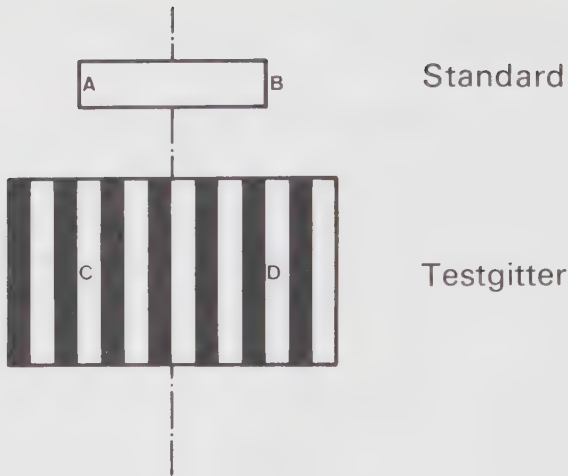


Abb.1: Mögliche Strategien beim Vergleich von Standard und Testreiz.

- 1.) Vergleich der Punkte A-C und B-D, entspricht dem Tiefenvergleich (Nullabgleich)
- 2.) Vergleich der Punkte A-B und C-D, entspricht dem Vergleich der räumlichen Orientierung.

des stereoskopischen Sehens zu Grunde liegen. Die Konsequenz wäre, dass zwei verschiedene Mechanismen das stereoskopische Sehen ermöglichen, und somit zwei verschiedene Arten von Detektoren vorhanden wären.

Ist es überhaupt möglich zwei solche Detektoren separat zu untersuchen, oder, mit was für Detektoren arbeitet eine Versuchsperson beim Betrachten eines binokular projizierten Sinusgitters? Der klassische Detektor der Querdissparation,

der Querdisparationsdetektor, empfängt Informationen von zwei nichtkorrespondierenden Stellen beider Retinen (Abb.2). Der zweite hypothetische Mechanismus erfordert, dass die neuen Detektoren, nennen wir sie Grössendetektoren, bereits im monokularen Bereich liegen, d.h. die Grösse (bzw. Gitterperiode oder Ortsfrequenz) wird bereits monokular detektiert und verarbeitet (Abb.3).

Im nun folgenden Abschnitt vergleiche ich die Anordnung der Grössendetektoren mit den klassischen Querdisparationsdetektoren. Nach klassischem Begriff geschieht die Analyse der Tiefe in Querdisparationsdetektoren (Abb.2). D_1 und D_2 repräsentieren je einen Querdisparationsdetektor, die Informationen von zwei nichtkorrespondierenden Netzhautstellen beider Augen bekommen. Entsprechend den verschiedenen Querdisparationen gibt es für jeden Punkt des binokularen Gesichtsfeldes, verschiedene solche Detektoren. Weiter zentralwärts werden dann die Signale dieser Detektoren von den Punkten 1 und 2 miteinander verglichen (ΔD) und ein eventueller Unterschied wird signalisiert. Beim Vergleich der räumlichen Orientierung könnte es sich um sogenannte Grössendetektoren (bzw. Ortsfrequenzdetektoren oder Periodendetektoren) handeln (Abb.3). Der Detektor G_L bekommt die Information von derselben Retina, jedoch von mindestens zwei verschiedenen Punkten, ebenso G_R . Beide Detektoren geben die Information an einen Grössenkomparator ΔG weiter, der den Unterschied zwischen G_L und G_R signalisiert. Abb. 2 und 3 zeigen den möglichen Weg der stereoskopischen Information. Beim Tiefenabgleich verläuft die binokulare Information direkt zu einem Disparationsdetektor. Beim Vergleich der räumlichen Orientierung geschieht die erste Verarbeitung äusserst früh, d.h. eine Information wird bereits monokular detektiert, im Grössendetektor, und dann erst, zum Vergleich mit der Gegenseite, weitergegeben.

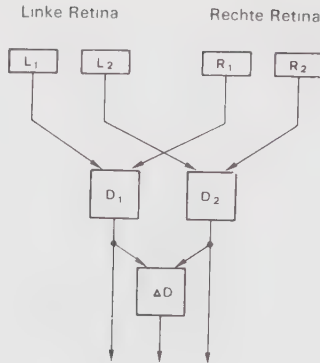


Abb 2. Modell 1. L_1, L_2 und R_1, R_2 sind Areale der linken bzw. rechten Retina. D_1, D_2 sind binokulare Analysatoren für Querdissparation nach der klassischen Vorstellung. Die Signale von D_1 und D_2 werden auf höherer Stufe in einem hypothetischen Komparator ΔD verglichen.

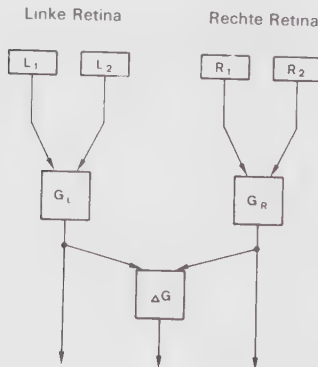


Abb 3. Modell 2. L_1, L_2 und R_1, R_2 wie in Abb. 2. G_L, G_R sind monokulare Analysatoren für Grösse (bzw. Ortsfrequenz). Der Vergleich der Signale im Komparator ΔG ergibt die stereoskopische Information über Schräge.

I.3.2. Ein neuer Testreiz

Aus diesen Ueberlegungen folgt, dass eine experimentelle Differenzierung zwischen beiden Mechanismen nur möglich ist, wenn es gelingt, den direkten Tiefenvergleich aufgrund der Querdissparation auszuschalten. Wir haben dazu folgende Reizbedingung gewählt, die wir "disparity-wobble" nennen. Wie in Blakemore's Experiment wurden zwei Sinusgitter unabhängig in beide Augen projiziert, deren Ortsfrequenzunterschied die Versuchsperson einstellen konnte. Beide Gitter wurden dabei in kurzen Zeitabständen (alle 40 msec) sprungartig um einen gewissen Bruchteil ihrer Periodenlänge gegeneinander verschoben, so dass korrespondierende Punkte beider Gitter jedesmal mit einer neuen Querdissparation erschienen. Die Sprünge erfolgten entsprechend einer Pseudo-Zufallsfolge, in der eine Reihe von Querdissparationen, bis zu einem Wert von je einer Gitterperiode in gekreuzter und ungekreuzter Richtung, gleichhäufig auftraten. Da ein Gitter stereoskopisch schon verschiedene Querdissparationen - in Abständen von je einer Periodenlänge - repräsentiert*, erhalten wir mit unserer Variation einen Reiz, der alle überhaupt möglichen Querdissparationen durchläuft. Wenn nun ein bestimmtes Verhältnis der Ortsfrequenzen eingestellt wird, entsteht die gleiche "Größen" - oder "Ortsfrequenzdissparation" wie in Blakemore's Experiment. Die Detektoren G_L und G_R in Abb.3 werden also entsprechend verschiedene Werte signalisieren. Das neue am "disparity-wobble" ist jedoch, dass durch diese Einstellung die Querdissparation nicht beeinflusst wird, da sie an jedem Punkt des Testfeldes alle möglichen Werte durchläuft. Die Versuchsperson kann also die Empfindung der Querdissparation nicht zum Abgleich mit dem Standard verwenden.

* Man kann dies am periodischen Muster, z.B. Tapeten, beobachten ("Tapeteneffekt").

Im Schema von Abb. 2 werden also die Detektoren D_1 und D_2 , soweit sie überhaupt ansprechen, im Mittel genau das gleiche Signal abgeben. Ein vollständiger Zyklus der verschiedenen Querdissparationen wurde in unseren Experimenten in 1,3 sec, also sehr rasch, durchlaufen.

In unseren Experimenten versuchen wir einen quantitativen Vergleich zwischen den beiden Detektorentypen herzustellen. Ein konventioneller stereoskopischer Reiz, z.B. ein Lichtbalken, wird dem oben erwähnten "disparity-wobble" gegenübergestellt. Verfügt die Versuchsperson einzig über Querdissparationsdetektoren, so wäre zu erwarten, dass bei Reizbedingungen, wie dem "disparity-wobble", keine Schräge gesehen wird. Kann aber die Versuchsperson trotz dem "disparity-wobble" Schräge sehen, so existieren Detektoren für den binokularen Grössenvergleich (Ortsfrequenzvergleich), die fähig sind einen solchen Stimulus zu verarbeiten. Als dritte Reizart verwendeten wir stationäre Sinusgitter, den gleichen Stimulus, den Blakemore benutzt hat.

I.4. Zusammenhang zwischen Grössendisparation und Schräge

Abb.4 zeigt die geometrischen Verhältnisse von oben gesehen und gibt den Zusammenhang zwischen Grössendisparation und Schräge wieder. L und R sind die Knotenpunkte der Augen, M der Mittelpunkt zwischen L und R. In der Linie NP befindet sich die Ebene, die um die senkrechte Achse in O um den Winkel α gedreht ist. Mit x bezeichnen wir die Fixationsebene, in der die beiden stereoskopischen Einzelbilder erzeugt werden. Die Schnittpunkte der Gesichtslinien LP und RP mit der Fixationsebene ergeben die Einzelbilder des Punktes P, P_L und P_R . Die Strecke OP wird stereoskopisch durch die verschieden langen Strecken, OP_L für das linke Auge, und OP_R für das rechte Auge, erzeugt.

Der Unterschied, also der Abstand $P_L P_R$ ist die Grössendisparation der Strecke OP. Die Beziehung $P_L P_R / OQ$ bezeichnen wir als die relative Grössendisparation.

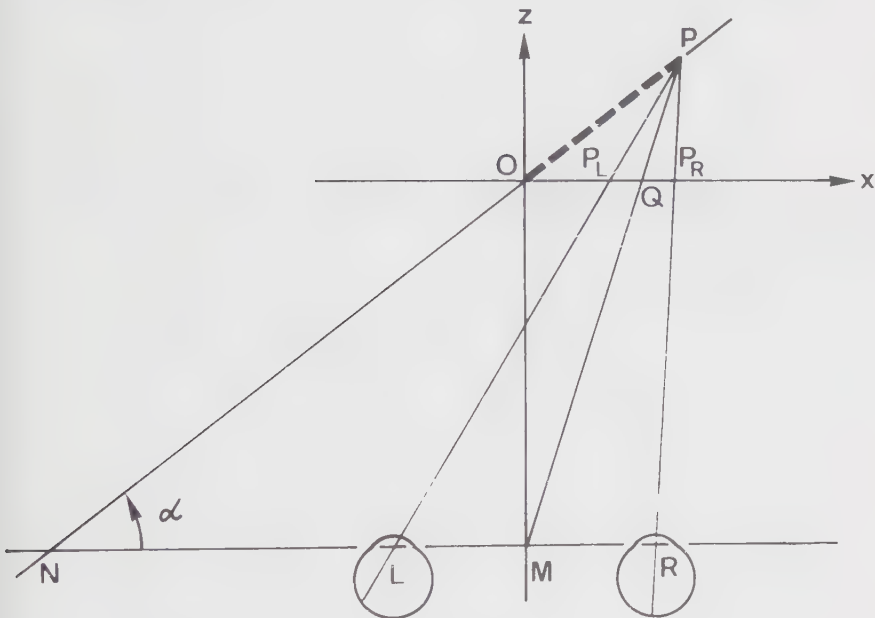


Abb. 4. Schematische Darstellung der Versuchsanordnung (vgl. Text)
LR = Pupillendistanz (= $2a$), MO = Beobachtungsab-
stand (= b), O = Rotationsachse (in Aufsicht).

Nach dem Strahlensatz gilt:

$$\frac{OQ}{NM} = \frac{P_L Q}{LM} = \frac{1}{2} \times \frac{P_L P_R}{LM}$$

also $\frac{P_L P_R}{OQ} = 2 \times \frac{LM}{NM}$ da der $\tan d = \frac{MO}{NM}$ ist, ergibt

sich $\frac{P_L P_R}{OQ} = \frac{2 \times LM}{MO} \times \tan d = \text{relative Grössendisparation}$

Wenn $2a (=LR)$ die Pupillendistanz und $b (=MO)$ die Beobachtungsentfernung ist, so gilt

$$\text{relative Grössendisparation} = \frac{2a}{b} \times \tan d$$

II. Methode

II.1. Versuchsaufbau

Abb.5 zeigt eine perspektivische Darstellung unserer Versuchsanordnung. Auf dem Bildschirm eines Oszillographen wurden zwei Figuren erzeugt. Durch die Abbildungslinsen wurden

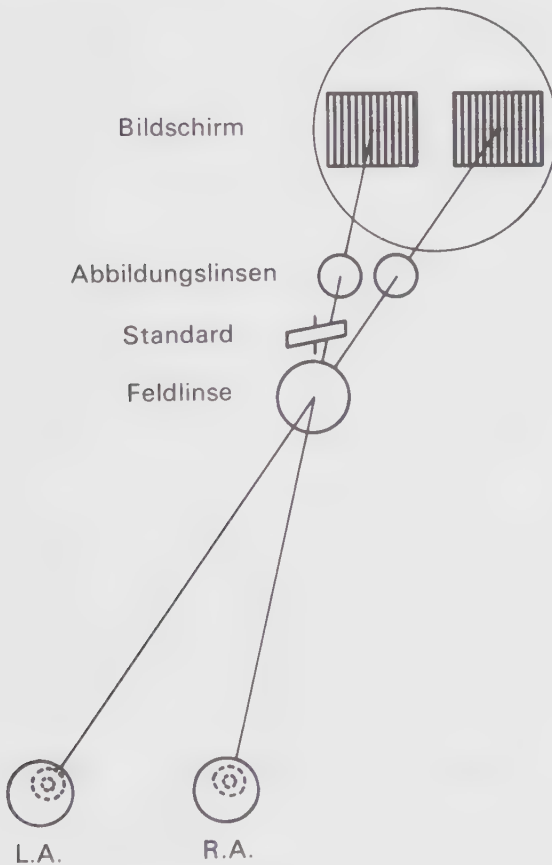


Abb.5. Perspektivische Zeichnung der Versuchsanordnung.
L.A. = linkes Auge, R.A. = rechtes Auge.

von beiden Figuren Bilder in der Fixationsebene, nahe der Feldlinse, entworfen. Die Feldlinse bildete die Abbildungslinsen auf die Augen der Versuchsperson ab. Damit wurde jedes der beiden Bilder nur von dem betreffenden Auge gesehen, beide befanden sich jedoch, wie unter natürlichen Bedingungen, am gleichen Ort des Raumes. Der Abstand vom Beobachter zur Fixationsebene betrug 75 cm. Direkt über der Feldlinse wurde der drehbare Standard angebracht, ein homogener rechteckig weisser Lichtbalken von 41 mm Breite und 6,5 mm Höhe. Der Abstand zwischen dem Mittelpunkt des Testreizes und dem unteren Rand des Standards betrug 31 mm. Die Versuchsperson schaute durch einen um 45° geneigten halbdurchlässigen Spiegel über den eine homogene Hintergrundbeleuchtung addiert wurde. Mittels Kinnstütze und Stirnbügel wurde der Kopf der Versuchsperson in gleicher Lage gehalten. Die Versuchsperson konnte die horizontale Ausdehnung der beiden monokularen Bilder durch Drehen an einem Potentiometer variieren. Die Variation geschah symmetrisch, d.h. ein monokulares Bild wurde um denselben Betrag vergrössert, wie das andere verkleinert wurde. Dabei wurde die Leuchtdichte beider Bilder konstant gehalten. Den Unterschied, bezogen auf die Ausgangsgrösse, bezeichnen wir als relative Grössendisparation (siehe Abschnitt I.4.).

Fünf verschiedene stereoskopische Reizarten wurden verwendet.

1.) Lichtbalken: Zwei horizontal angeordnete, homogene Lichtbalken von je 8 mm Höhe (entsprechend $0,5^{\circ}$ Sehwinkel) und, ohne Grössendisparation, von 33 mm Breite (entsprechend $2,5^{\circ}$ Sehwinkel). Das fusionierte Bild war ein um die senkrechte Achse drehbarer Balken.

2.) Stationäres Sinusgitter: Die beiden monokularen Bilder bestanden aus senkrechten Balken von sinusförmigem Leuchtdichteprofil. Die Ortsfrequenz betrug 3,5 Perioden/Grad. Eine Versuchsanordnung entsprechend den Experimenten von Blakemore.

3.) Stationäres Rechteckgitter: Die beiden monokularen Bilder bestanden aus senkrechten Balken von rechteckförmiger Lichtintensität. Die Balken erschienen dem Beobachter als scharfrandig.

4.) "Disparity-wobble": Eine Reizmodulation bei der die obenerwähnten Sinusgitter verwendet wurden, sie wurden jedoch bewegt. Die beiden Sinusgitter wurden zeitgleich, horizontal und gegeneinander, beide um denselben Betrag, jedoch mit verschiedenen Vorzeichen, verschoben. Der Bereich in dem die Verschiebungen der beiden Gitter stattfand, entsprach einer Periode. Dabei wurden die Gitter über 16 Stufen, in einer Pseudo-Zufallsfolge, in einem Zyklus von 1,3 sec variiert. Eine bestimmte Einstellung wurde 40 msec lang gezeigt, danach wechselte das Bild zu einer neuen Einstellung, insgesamt 25 Einstellungen pro Sekunde.

5.) "Position-wobble": Es kamen wieder Sinusgitter zur Anwendung, wobei die beiden Sinusgitter wiederum zeitgleich, horizontal und um denselben Betrag verschoben wurden, diesmal jedoch in Phase, d.h. mit gleichen Vorzeichen. Eine bestimmte Einstellung wurde wieder 40 msec lang gezeigt, insgesamt also 25 Einstellungen pro Sekunde.

Bei den Sinusgittern und beim Rechteckgitter erzeugte der Grössenunterschied zwischen den Bildern einen Ortsfrequenzunterschied. Mittels einer runden Lochblende, unmittelbar vor der Feldlinse angebracht, wurden Sinus - und Rechteckgitter auf einen Durchmesser von 45 mm (entsprechend $3,5^{\circ}$ Sehwinkel) begrenzt. Die Leuchtdichte des Hintergrundes betrug 27 asb, die des Standards und der stereoskopischen Lichtbalken 85 asb, Die Gitter hatten eine mittlere Leuchtdichte von 48 asb und 22 % Kontrast*.

*Der Kontrast ist definiert als

$$\frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \times 100 \%$$

II.2. Versuchsablauf und Datengewinnung

Die Instruktion an die Versuchsperson war, durch Drehen am Knopf des Potentiometers, den binokularen Testreiz solange zu variieren, bis er dem vorgegebenen Standard möglichst parallel erschien. Es wurde also mit dem Standardobjekt ein Winkel vorgegeben, und die Versuchsperson hatte die Grössendisparation des Testreizes zu variieren, bis subjektiv die gleiche Schräge erreicht wurde. Das Potentiometer erlaubte zehn Umdrehungen. Die mechanische Auflösung war so hoch, dass die Versuchsperson ohne Mühe die gewünschte Schräge einstellen konnte, jedoch niemals den Anschlag erreichte. Jede Einstellung wurde durch Knopfdruck auf einem Drucker registriert. Zusätzlich löste der Knopfdruck eine Verstellung des Testreizes aus, damit die Versuchsperson bei der nächsten Einstellung eine neue Ausgangslage hatte. Gemessen wurde die Differenz beider Bilder in mVolt. Fünf Einstellungen wurden hintereinander gemacht, danach eine Pause von etwa 3 Minuten eingeschaltet. Eine Einstellung dauerte ca 30 Sekunden.

II.3. Versuchspersonen

Die Versuchspersonen waren Freiwillige. Fünf, Versuchspersonen, EF, ERD, IR, FG, und ER wurden erstmals mit derartigen psychophysischen Experimenten konfrontiert. Die Versuchsperson RVDH hatte bereits Erfahrung mit ähnlichen stereoskopischen Experimenten. Die Versuchspersonen FG und ER waren Brillenträger, bei den Experimenten wurden die Korrekturlinsen getragen. (FG: R sph -5,75, 3 pdpt Basis temp. / L sph -6,25, zyl. -0,5 (180°), 1 pdpt Basis unten) (ER: R sph -1, zyl. 0,25 Achse 90° / L sph -1, zyl. 0,25 Achse 90°).

II.4. Bestimmung des Augenabstandes

Der Augenabstand wurde photographisch ermittelt. Es wurde darauf geachtet, dass die Versuchsperson beim Photographieren denselben Konvergenzwinkel aufwies wie im Experiment. Dazu wurde die Eintrittspupille der Kamera in die Fixationsebene unserer experimentellen Anordnung gebracht und die Versuchsperson aufgefordert einen Punkt in dieser Fixationsebene, nahe beim Kameraobjektiv, zu fixieren. Ein mit photographierter Massstab, welcher über den Augen der Versuchsperson angebracht war, erlaubte uns, die genaue Pupillendistanz aus dem erhaltenen Bild zu ermitteln.

III. Resultate

III.1. Vergleich der stereoskopischen Schwellen

Das Ziel unserer Experimente war, festzustellen, ob bei Bedingungen wie dem "disparity-wobble", tatsächlich Schräge gesehen wird, also unter Bedingungen bei der die Querdispersion ausgeschaltet wird. Es gilt nun diese neue Sehleistung konventionellen Reizarten gegenüberzustellen.

Sechs Versuchspersonen wurden unter fünf verschiedenen stereoskopischen Bedingungen getestet: Lichtbalken, stationäres Sinusgitter, stationäres Rechteckgitter, Sinusgitter mit "disparity-wobble" und Sinusgitter mit "position-wobble".

Mit dem Rechteckgitter sollte untersucht werden, ob die Form der Gitterbalken einen Einfluss auf die Grösse der wahrgenommenen Schräge hat, und ob Blakemore's Resultate speziell bedingt sind durch die Verwendung von Sinusgitter die ja optisch den Eindruck eines unscharfen Gitters geben. Das Rechteckgitter hatte die gleiche Ortsfrequenz, jedoch scharf begrenzte, helle und dunkle Balken. Mit "position-wobble" bezeichnen wir eine Reizmodulation, bei der die Phasenlage jedes Gitters jeweils gemeinsam in die gleiche Richtung verschoben wird, anstatt gegeneinander wie in der "disparity-wobble" Situation. "Position-wobble" ist bei monokularer Betrachtung nicht von "disparity-wobble" zu unterscheiden. Stereoskopisch jedoch ist das Gitter mit "position-wobble" dem stationären Gitter äquivalent, denn die Querdispersion hat an jedem Punkt des Gesichtsfeldes einen konstanten Wert. Das Gitter verändert also seine Position nur innerhalb der eingestellten Ebene. Diese Reizart dient uns als Kontrolle dafür, ob die Bedingung "disparity-wobble" eine unspezifische Erschwerung der Testaufgabe bedeutet. Die schnelle Variation des Reizes in den "wobble" Situationen, ruft einen Eindruck

von Flimmern und ungeordneter Bewegung hervor, und stellt sicher schon an die Verarbeitung in der Retina und in der Sehbahn grössere Anforderungen. Zeitliche Summation und Flicker-Adaptation müssen zu einer Verschlechterung der Kontrastübertragung führen. Man könnte daher erwarten, dass die visuelle Leistung des Beobachters in jedem Fall mit "wobble" schlechter ausfällt als unter stationären Bedingungen.

Die Versuchspersonen hatten in diesem Experiment die Aufgabe drei Winkel, die mit dem Standard vorgegeben wurden, mit dem Testreiz einzustellen: 0° (fronto-parallel) und je 30° nach beiden Seiten. In jeder Stellung wurden fünf Messungen durch Knopfdruck registriert. Nacheinander wurden 0° , $+30^\circ$, -30° und wieder 0° vorgegeben. Jede Reizart wurde zweimal, verteilt auf zwei Sitzungen, getestet. In einer Sitzung (Dauer ca 30 Minuten) wurden zwei verschiedene Reize getestet, dies ergab total fünf Sitzungen. Bei fünf Registrierungen pro Einstellung erhielten wir 20 Messwerte für die 0° Einstellung und je 10 Messwerte für die $+30^\circ$ bzw. -30° Einstellung. Die Standardabweichung einer Anzahl von Messungen ist ein Mass der stereoskopischen Schwelle, d.h. des kleinsten Disparationsunterschiedes, der gerade bemerkt werden kann. Um eine Aussage über die Leistung dieses neuen Seh-Mechanismus zu machen, gilt es die Standardabweichungen von Messungen mit konventionellen Stimuli mit jener des "disparity-wobble" zu vergleichen.

Abb.6 zeigt die Standardabweichungen der Messwerte der 0° Einstellungen, logarithmisch aufgetragen, von den vier Reizarten: Lichtbalken ($\equiv$), stationäres Sinusgitter ($\sim$ stat.), "disparity-wobble" ($\sim$ disp.w.) und "position-wobble" ($\sim$ pos.w.). Von den Versuchspersonen ER, IR und RVDH, die noch an weiteren Experimenten teilnahmen, wurden alle Werte der 0° -Einstellungen verwendet, z.T. bis 100 pro Versuchsbedingung.

Die letzten drei erwähnten Bedingungen wurden statistisch mit der Balkenbedingung verglichen (F-Test). Signifikante Unter-

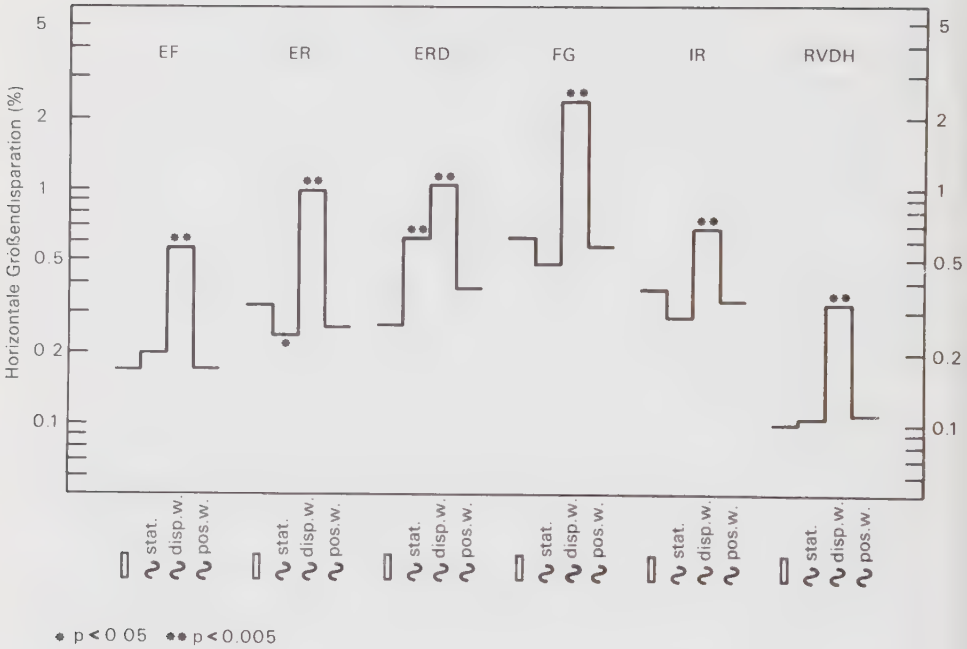


Abb.6. Stereoskopische Schwellen für die Wahrnehmung von Schräge unter vier verschiedenen Reizbedingungen: Lichtbalken ($\square$), Sinusgitter stationär ($\sim$ stat.), mit "disparity-wobble" ($\sim$ disp.w.) und mit "position-wobble" ($\sim$ pos.w.). Die Angaben der Signifikanz beziehen sich auf den Unterschied zur Lichtbalken-Bedingung.

schiede auf dem 5 % Niveau sind mit einem Stern (*), auf dem 0,5 % Niveau mit zwei Sternen (**) bezeichnet.

Sämtliche Schwellen sind ausserordentlich klein, nur ein Wert

erreicht 2 %, alle andern Werte liegen unter 1 %. Der stereoskopische Grössenvergleich ist also auch bei Ausschaltung des klassischen Mechanismus durch "disparity-wobble", immer noch recht genau. Werden zwei Gitter dem gleichen Auge nebeneinander dargeboten, so sind derart kleine Unterschiede der Ortsfrequenz nicht wahrnehmbar. Beim Sinusgitter mit "disparity-wobble" sind jedoch bei allen Versuchspersonen die Schwellen signifikant höher als beim Balken (im Durchschnitt um den Faktor 3), während sich die beiden andern Sinusgitterbedingungen, stationär und "position-wobble", nicht systematisch unterscheiden. Abgesehen von einer Versuchsperson, ERL, scheint die Einstellung mit dem stationären Sinusgitter (Blakemore), mindestens ebenso genau zu sein, wie mit dem Balken, dem konventionellen stereoskopischen Reiz. Dies gilt interessanterweise auch für Sinusgitter mit "position-wobble". Man kann daraus schliessen, dass die Erhöhung der Schwelle durch "disparity-wobble" tatsächlich auf der Ausschaltung des Mechanismus der Querdissipation beruht, und nicht auf unspezifischen Faktoren, die mit dem "wobble" zusammenhängen.

Die fünfte Reizbedingung, das stationäre Rechteckgitter, ergab bei allen Versuchspersonen praktisch die gleichen Schwellen wie beim stationären Sinusgitter. Diese Schwellenwerte wurden daher nicht in die Abbildung aufgenommen.

III.2. Die Grösse der stereoskopischen Empfindung (Validität)

Unter der "disparity-wobble" Bedingung wurde also Schräge gesehen. Im folgenden untersuchen wir die Grösse der stereoskopischen Empfindung, auch Validität genannt, im Vergleich mit dem konventionellen Reiz und den Gitterreizen. Die Validität ist das Verhältnis der Disparation des Standards zur eingestellten Disparation.

$$\text{Validität} = V = \frac{\text{Grössendisparation des Standards}}{\text{Eingestellte Grössendisparation}} = \frac{GD_{th.}}{GD_{exp.}}$$

Man kann diesen Quotienten auch als relative Empfindlichkeit bezeichnen wenn man die Empfindlichkeit definiert als

$$E = \frac{\text{wahrgenommener Winkel}}{\text{Grössendisparation}} = \frac{\alpha}{GD}$$

Der Quotient "Validität" ist demnach gleich dem Verhältnis der gemessenen Empfindlichkeit zur theoretischen Empfindlichkeit,

$$V = \frac{GD_{th.}}{GD_{exp.}} = \frac{\alpha}{GD_{exp.}} \bigg/ \frac{\alpha}{GD_{th.}} = E / E_{th.}$$

Abb.7 zeigt ein Diagramm wo die Validitäten der fünf Reiz-Bedingungen aufgetragen sind. Die Symbole bedeuten die sechs Versuchspersonen, wobei ein Symbol den Mittelwert von 20 Messungen darstellt, je 10 Messungen von -30° und $+30^\circ$. Wenn nun die eingestellte Disparität gleich gross ist wie die Grössendisparation von $+30^\circ$ bis -30° (Disparität des Standards), so beträgt die Validität 1, dieser Wert entspricht dem theoretischen Wert (gestrichelte horizontale Linie).

Das Mass der Validität der Experimente ist die Abweichung vom theoretischen Wert (=1). Ein eigentlicher Unterschied zwischen der "disparity-wobble" Bedingung und den andern vier Reizarten ist nicht abzulesen. Alle Resultate befinden sich in einem Bereich von 0,7 bis 1,07. Das X ist der entsprechende Wert, den wir aus Blakemore's Figur 8 abgelesen haben. Man sieht, dass dieser Wert nicht typisch ist. Von den 29 eingetragenen Werten liegen 6 über der theoretischen Linie, die restlichen 23 darunter. Ein Hinweis, dass bei allen Reizbedingungen eine Tendenz zur Unterschätzung der

Schräge vorhanden war, d.h. die jeweilig eingestellten Disparitäten waren meistens zu gross. Der einzige Unterschied zwischen der "disparity-wobble" Bedingung und den übrigen Stimuli ist, dass beim "disparity-wobble" die Schräge von allen sechs Versuchspersonen unterschätzt wurde.

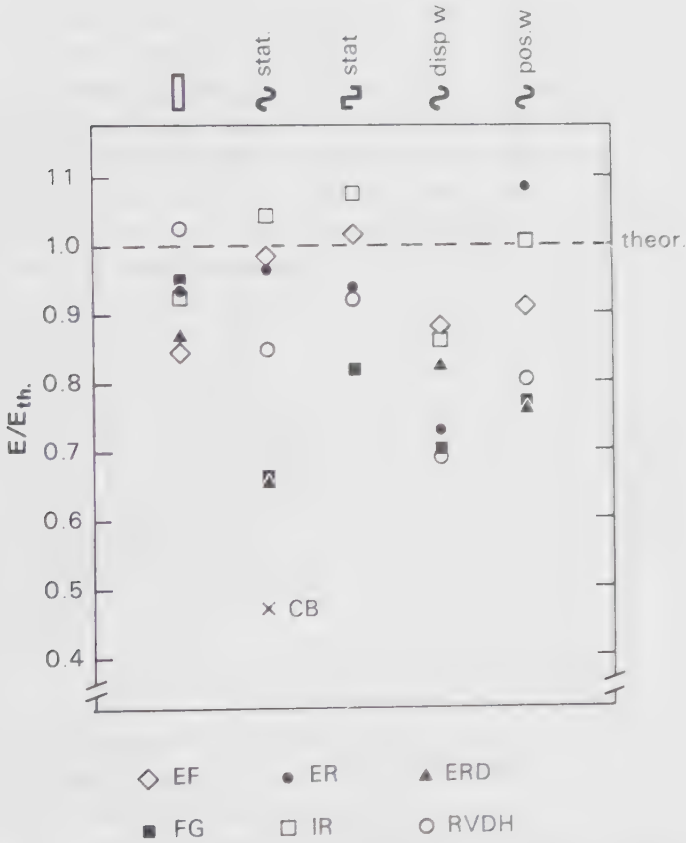


Abb.7: Vergleich der Validität der stereoskopischen Wahrnehmung unter fünf verschiedenen Reizbedingungen: Rechteck (▭), Sinusgitter stationär (~ stat.), Rechteckgitter stationär (▮ stat.), Sinusgitter mit "disparity wobble" (~ disp.w.) und mit "position wobble" (~ pos.w.).

III.3. Grenzen der quantitativen stereoskopischen Wahrnehmung

Die bisher beschriebenen Experimente beschränkten sich auf die Einstellung von drei Winkeln, $\pm 30^\circ$ und 0° , und die verschiedenen Reizbedingungen wurden bei sechs Versuchspersonen getestet und verglichen. Im folgenden Experiment wurde der Winkel systematisch, in Schritten von 10° variiert, und es wurde versucht, die Grenze des stereoskopischen Grösseneffekts zu bestimmen. Drei der Versuchspersonen wurden unter drei verschiedenen stereoskopischen Bedingungen getestet: Lichtbalken, Sinusgitter stationär und "disparity-wobble". Die Aufgabe war wiederum, die durch den Standard vorgegebene Schräge, mit dem Testreiz einzustellen, und zwar in einem Bereich von je mindestens 60° nach beiden Seiten. In der ersten Sitzung wurde bei 0° begonnen, dann stufenweise, in 10° -Schritten, zuerst nach links bis minimal 60° , anschliessend dasselbe auf der rechten Seite bis minimal 60° . In einer zweiten Sitzung wurde auf einer Seite bei 60° (bzw. 70°) begonnen, dann wiederum stufenweise, in 10° -Schritten gegen 0° gedreht, dasselbe auf der andern Seite. Für jede Einstellung wurden fünf Messungen durch Knopfdruck registriert. In einer Sitzung (Dauer ca $1\frac{1}{2}$ Stunden, unterbrochen durch eine Pause von 15 Minuten) wurden zwei verschiedene Reize genommen, dies ergab insgesamt 3 Sitzungen. Bei fünf Registrierungen pro Einstellung erhielten wir 10 Messwerte für jede Einstellung.

Die Abb.8 - 10 zeigen die Resultate, wobei die Abszisse den Rotationswinkel, vorgegeben durch den Standard, angibt und die Ordinate die prozentuale horizontale Grössendisparation. 0° bedeutet fronto-parallel, positive Winkel bedeuten Rotation im Uhrzeigersinn von oben gesehen. Die eingezeichneten Punkte repräsentieren den jeweiligen Mittelwert aus 10 Messungen, die Querstriche je zwei Standardfehler. Bei den Punkten ohne eingezeichnete Standardfehler ist das Intervall kleiner

als das Symbol. Das Intervall zwischen den Strichen entspricht also dem vierfachen Standardfehler. Die ausgezogene Linie ist die theoretische Funktion, die Beziehung zwischen Rotationswinkel und horizontaler Grössendisparation, berechnet nach Abb.4.

Bei allen Versuchspersonen kann übereinstimmend gesagt werden, dass bei jeder Reizart, Lichtbalken, stationäres Sinusgitter oder "disparity-wobble", in einem Bereich von etwa -40° bis $+40^{\circ}$, die Messpunkte annähernd die theoretischen Werte erreichen. Das Abweichen der Messpunkte, im Sinne eines Steilerwerdens, beginnt bei den meisten Experimenten etwas ausserhalb dieses Bereichs. Die gedachte Linie zwischen den Messpunkten ist für Lichtbalken und stationäres Gitter der theoretischen ähnlich; sie unterscheidet sich im Wesentlichen in der Steilheit, d.h. im stärkeren Abweichen von den theoretischen Werten mit zunehmender stereoskopischer Schräge. Eine steilere Kurve bedeutet hier eine geringere Empfindlichkeit.

Unter "disparity-wobble" Bedingung zeigen RVDH, und andeutungsweise auch ER, Abweichungen von der theoretischen Kurvenform. Die Messpunkte folgen einer Kurve, die bei kleineren Winkeln, etwa zwischen -30° und $+30^{\circ}$, nur wenig steiler ist als die theoretische, bei grossen Winkeln jedoch einen steileren Verlauf nimmt. Das bedeutet, dass eine zusätzliche Grössendisparation schliesslich nur noch eine geringe Steigerung des wahrgenommenen Winkels bringt. Der wahrgenommene Winkel erreichte bei dieser Reizart einen Maximalwert, so dass die Versuchsperson bei grösseren Winkeln des Standards keine Parallelität mehr einstellen konnte. Bei weiterer Erhöhung der Grössendisparation verminderte sich der wahrgenommene Winkel wieder. Die Grenze, also die Grössendisparation, die in der Wahrnehmung ein Maximum an Schräge erzeugt, wurde in einem separaten Experiment bestimmt; die Versuchsperson suchte, ohne Standard, eine maximale Schräge der Figur einzustellen. Die Einstellungen waren gut reproduzierbar. (die Standard-

abweichungen betrugen 1,5 % - 3 % der Grössendisparation). Die Mittelwerte von je 10 Einstellungen sind in in den Abb. 8 - 10 als schwarze Pfeile eingezeichnet. Man sieht, dass die Versuchsperson IR bei 60° die Grenze bei weitem noch nicht erreicht hatte (der Bereich der vorgegebenen Winkel wurde zu klein gewählt). Wahrscheinlich ist deswegen die erwähnte Abweichung von der theoretischen Kurve hier nicht sichtbar.

Die Resultate geben einen Eindruck von der Leistung des neuen Mechanismus. Wir sehen, dass die Schätzung der Schräge auch unter Ausschluss der Querdisparation über einen weiten Bereich quantitativ möglich ist. Die Genauigkeit der Einstellung nimmt bei grossen Schrägen deutlich ab, die Standardabweichungen werden grösser. Dies ist mindestens teilweise durch den steileren Verlauf der experimentellen Kurve bedingt. Eine ähnliche Zunahme der Streuung wird auch unter den andern Reizbedingungen beobachtet. Dabei muss berücksichtigt werden, dass auch die Wahrnehmung des Standards bei grösseren Winkeln unsicher wird.

Das Experiment mit dem stationären Sinusgitter ist eine Wiederholung von Blakemore's Experimenten. Er fand, dass die eingestellten Ortsfrequenzdifferenzen einer wesentlich steileren Kurve folgten als der entsprechenden theoretischen Kurve. Dieses Phänomen konnte bei unseren Experimenten nicht in dem Masse verifiziert werden. Im Bereich von -40° bis $+40^{\circ}$ zeigen unsere Resultate eine ziemlich gute Annäherung an die theoretischen Werte. Nur eine Versuchsperson zeigt eine grössere Steigung (RVDH), IR dagegen eine geringere Steigung, während ER praktisch keine systematische Abweichung zeigt. Die Periodizität des Reizes scheint also bei einigen Beobachtern die Empfindung von Schräge zu vermindern (vgl. Blakemore), bei andern dagegen eher zu verstärken (IR).

Wie in Blakemore's Experiment liessen wir mit dem stationären Sinusgitter die maximale Grössendisparation einstellen, bei der die Gitter noch fusioniert werden konnten (Fusionsgrenze).

Nach jeder Seite wurden wiederum 10 Registrierungen vorgenommen. In Abb.8 - 10 sind die Resultate dieses Experiments durch offene Pfeile ($\Rightarrow$) markiert. An diesem Punkt zerfiel die Ebene in mehrere Teile, zuerst in drei, symmetrisch angeordnet, bei weiterem Drehen erschienen dann noch mehr Teile. Aehnliche Beobachtungen machte Blakemore in seinen Experimenten und nannte dieses Zerfallen der Ebene "break of fusion". In seinen Messungen ging er über diesen Punkt nicht hinaus. Nach seiner Hypothese können binokular wahrgenommene Ortsfrequenzen nur dann neuronal verwertet werden, wenn der Unterschied beider Ortsfrequenzen im linken und rechten Auge die Fusionsgrenze nicht überschreitet. Nach unseren Beobachtungen bedeutet der Zerfall der Ebene oder "break of fusion" nicht die Grenze des stereoskopischen Sehens. Von einem bestimmten Ortsfrequenzverhältnis an werden optisch kleinere Einheiten analysiert, wobei jedoch in der Nähe des Fixationspunktes immer noch eine deutliche Empfindung von Schräge herrscht, die durchaus quantitativ verwertet werden kann. Wie die Resultate von RVDH und ER (Abb.9 und 10, $\sim$ stat.) zeigen, können Grössendisparationen von mindestens dem Doppelten der Fusionsgrenze verwertet werden; die Messpunkte deuten an der Fusionsgrenze keine Diskontinuität an. Ueber 70° hinaus konnten wegen der perspektivischen Verkürzung des Standards keine Einstellungen mehr gemacht werden. Nach unseren qualitativen Beobachtungen können jedoch noch grössere Winkel (in einem Teilstück des Gitters) wahrgenommen werden, wobei die Grössendisparation dann rapid anwächst (vgl. theoretische Kurve). Die Grössendisparation des maximalen Winkels liess sich daher beim stationären Gitter nicht bestimmen.

Unter "disparity-wobble" Bedingung fanden wir dagegen keinen eigentlichen Zusammenbruch der Fusion wie beim stationären Sinusgitter. Beim Suchen nach der maximalen Schräge, wie oben beschrieben, wurden bedeutend höhere Werte der Grössendispa-

ration gefunden (Pfeile $\Rightarrow$). Die Grössendisparation der maximalen Schräge in der "disparity-wobble" Situation, lag um einen Faktor 1,35 (IR), 1,40 (ER), bzw. 1,44 (RVDH), höher als die Grenze der Fusion.

Der Vergleich dieser Maximalwerte lässt vermuten, dass der neue Mechanismus eine grössere Spannweite im Bereich der Grössendisparation hat als der Mechanismus der Fusion. Es muss jedoch eine grössere Streuung in Kauf genommen werden.

Abb.8 - 10: Horizontale Grössendisparation (Ordinate), d.h. prozentualer Unterschied beider monokularen Bilder in horizontaler Ausdehnung, von drei verschiedenen Testreizen: Lichtbalken ($\square$), stationäres Sinusgitter ($\sim$ stat.) und "disparity-wobble" ($\sim$ disp.w.). Drei Versuchspersonen wurden getestet (IR, RVDH, und ER). Die Versuchsperson sollte die durch den Standard vorgegebene Schräge durch den Testreiz einstellen. Die Schräge, bzw. Rotationswinkel des Standards (Abszisse), wurde in 10° -Schritten, in einem Bereich von -60° (bzw. -70°) bis $+60^\circ$ (bzw. $+70^\circ$), variiert. Die eingezeichneten Punkte repräsentieren den jeweiligen Mittelwert aus 10 Messungen. Das Intervall zwischen den Querstrichen entspricht dem vierfachen Standardfehler. Bei den Punkten ohne eingezeichnete Standardfehler ist das Intervall kleiner als das Symbol. Die offenen Pfeile ($\Leftrightarrow$) markieren die Grenze der Fusion des stationären Gitters, die schwarzen Pfeile ($\Rightarrow$) den Punkt der maximalen Schräge bei "disparity-wobble" (siehe Text). Die ausgezogene Linie ist die vom Standard erzeugte Grössendisparation, berechnet nach Abb.4.

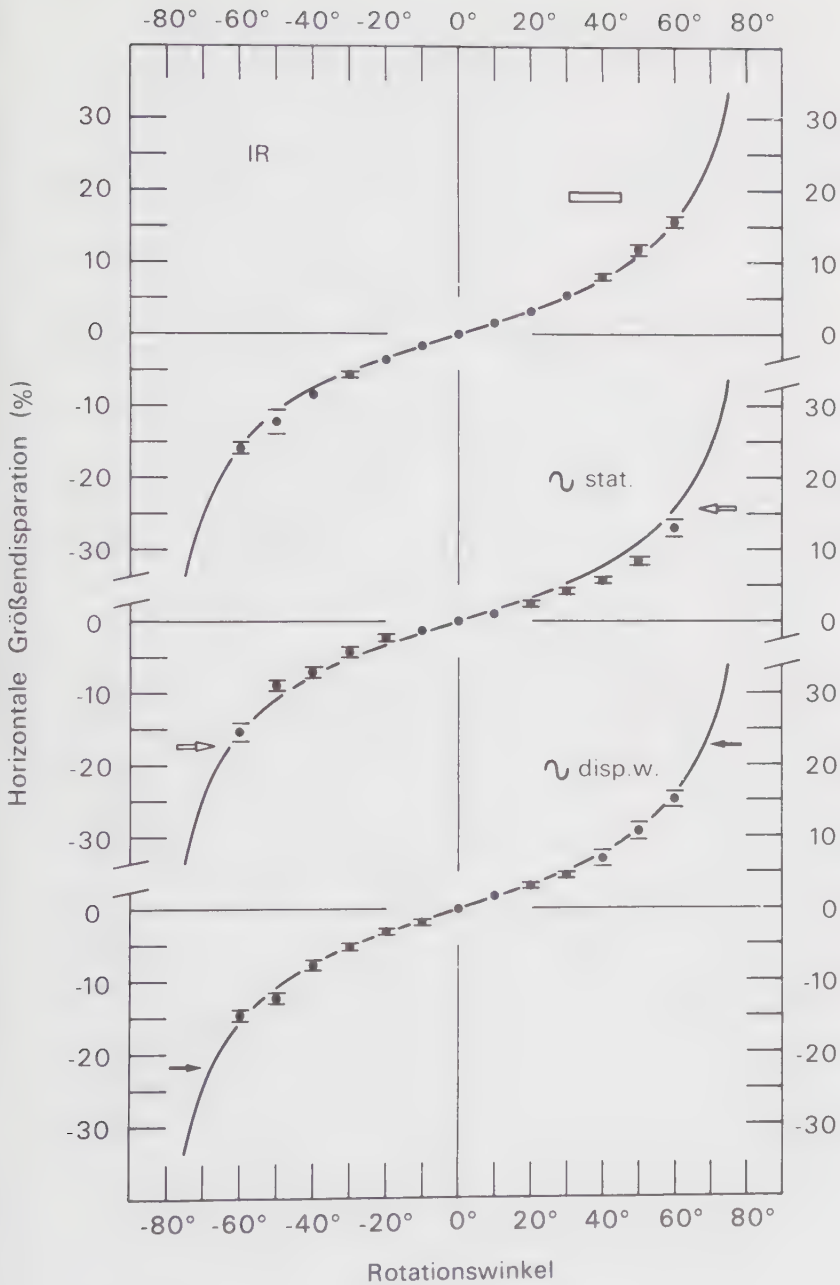


Abb.8: Messwerte der Versuchsperson IR (vgl. Text auf Seite 29)

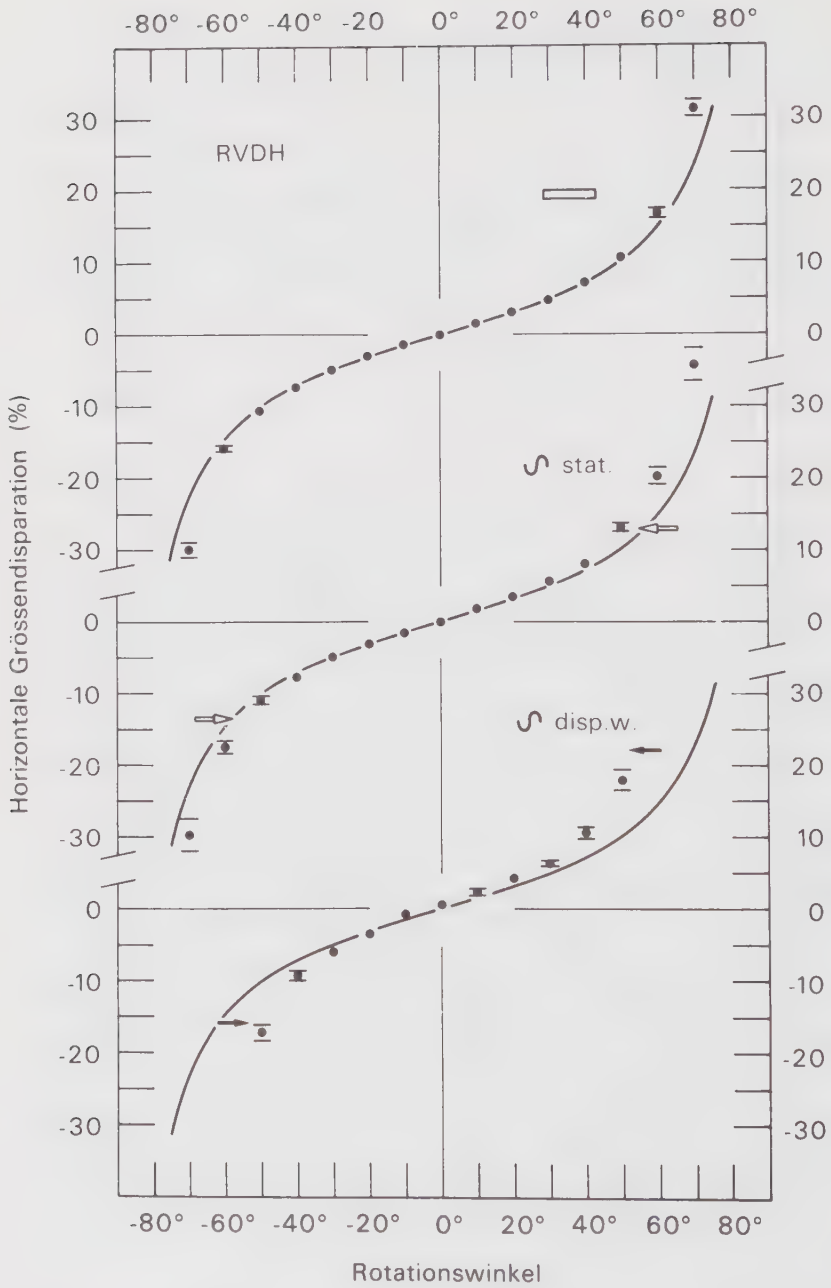


Abb.9: Messwerte der Versuchsperson RVDH (vgl. Text auf Seite 29)

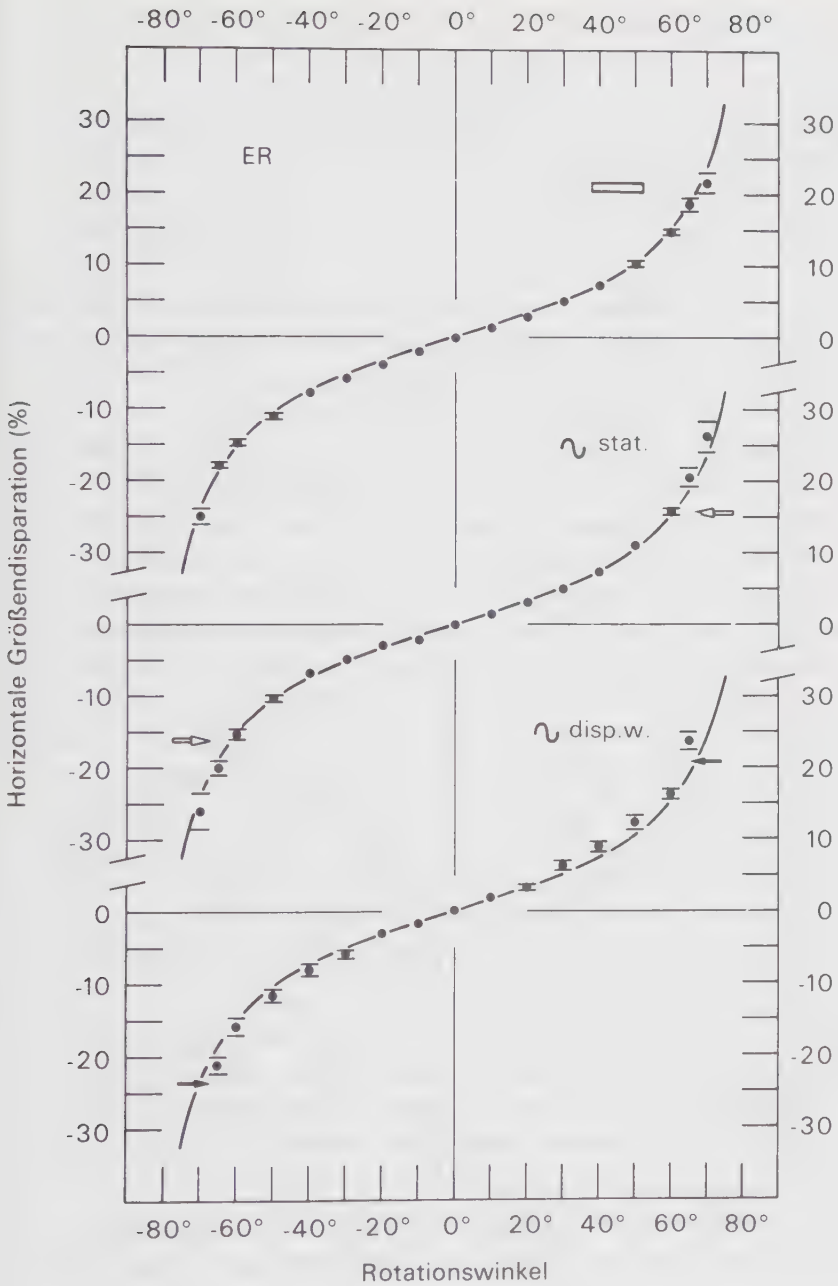


Abb.10: Messwerte der Versuchsperson ER (vgl. Text auf Seite 29)

IV. Diskussion

Wir haben gezeigt, dass Grössenunterschiede zwischen den beiden retinalen Bildern, stereoskopisch wahrgenommen werden, auch wenn Querdissparation nicht gegeben ist, also keine absolute Entfernung wahrgenommen werden kann. Schon sehr kleine Grössenunterschiede unter 1 %, die bei monokularem Vergleich nicht feststellbar wären, erzeugten stereoskopisch eine Rotation die auch von ungeübten Beobachtern wahrgenommen wurde. (Abb.6). Der wahrgenommene Winkel entsprach innerhalb gewisser Grenzen quantitativ recht gut dem Winkel, der unter gewöhnlichen Bedingungen an realen Objekten gesehen wird (vgl. theoretische Werte in Abb.7. und Abb.8-10). Die Grenzen der quantitativen Wahrnehmung lagen in unseren Experimenten mit einem Beobachtungsabstand von 75 cm bei etwa 50° - 60° . Die Streuung der Messwerte war unter diesen Bedingungen erwartungsgemäss grösser als unter Bedingungen, die einen Punkt-für-Punkt Abgleich der stereoskopischen Entfernung erlauben. Die stereoskopische Tiefenwahrnehmung aufgrund der Querdissparation spielt also sicher eine Rolle auch bei der Wahrnehmung von Schräge; unabhängig von der Entfernungsschätzung gibt es jedoch offensichtlich eine direkte Wahrnehmung von Schräge. Diese wird durch einen horizontalen Grössenunterschied der Bilder aktiviert. Es muss also neben dem Mechanismus der Querdissparation (Abb.2) noch ein Mechanismus nach dem Schema von Abb.3 existieren. Blakemore's Hypothese eines zweiten stereoskopischen Mechanismus wird also bestätigt.

Die Frage, ob dabei retinale Distanzen in beiden Augen gemessen und verglichen werden, oder Ortsfrequenzen, kann mit den geschilderten Experimenten nicht beantwortet werden. Beide Möglichkeiten werden durch das Schema in Abb.3 repräsentiert.

Wir haben argumentiert, dass die experimentelle Bedingung von Blakemore, die stereoskopische Betrachtung von zwei

stationären Sinusgittern, keine Entscheidung für den einen oder andern Mechanismus erzwingt. Unsere Resultate ergaben keinen Anhaltspunkt, dass bei der Wahrnehmung des stationären Gitters ein anderer Mechanismus als der klassische im Spiel ist: Die Schwellen waren sehr ähnlich wie unter konventionellen Bedingungen (Abb.6), und eine starke Abweichung in der Validität, wie sie in Blakemore's Resultaten zum Ausdruck kam, scheint sich bei andern Versuchspersonen nicht zu finden (Abb.7). Da unter Blakemore's Bedingung, wie unter allen andern Bedingungen, die Querdisparationen aufwiesen, durchwegs niedrigere Schwellen gefunden wurden als bei Ausschaltung der Querdisparation ("disparity-wobble"), müssen wir annehmen, dass bei stationären Sinusgittern der klassische Mechanismus den Ausschlag gibt.

Die Grenzen der Fusion schliesslich, wie sie Blakemore mit stationären Gittern bestimmt, scheinen nicht mit den Grenzen des zweiten stereoskopischen Mechanismus übereinzustimmen. Die Wahrnehmung der Schräge geht deutlich über den fusionierbaren Bereich hinaus, wie die Einstellungen der maximalen Schräge unter "disparity-wobble" Bedingungen zeigen (vgl. S.29 und Abb.8-10).

Die Einflüsse von Ortsfrequenz und Testfeldgrösse, auf die Blakemore seine Argumentation weitgehend aufbaut, wurden von uns nicht systematisch untersucht. Auch in dieser Hinsicht sind noch einige Fragen offen, deren Untersuchung jedoch über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen würde. Die vorliegenden Untersuchungen, die von der Arbeit Blakemore's angeregt wurden, sollen eine Basis für weitere Experimente sein, die zum Verständnis der neuronalen Mechanismen des stereoskopischen Sehens führen könnten. Das physiologische Korrelat kann schliesslich nur mit Hilfe von Einzelzell-Ableitungen im Tierexperiment nachgewiesen werden.

V. Zusammenfassung

Die Hypothese eines zweiten stereoskopischen Mechanismus, der aufgrund eines Grössenvergleichs beider Netzhautbilder zur räumlichen Wahrnehmung beiträgt, wurde mittels psychophysischen Experimenten untersucht. Dazu wurde ein Binokularreiz verwendet, bei welchem der klassische Mechanismus der Tiefenwahrnehmung, die Querdissipation, nicht angewendet werden konnte und der Beobachter dadurch gezwungen war, einen Testreiz, unter Ausschluss der Querdissipation, zu analysieren. Dieser Testreiz, in unseren Experimenten "disparity-wobble" genannt, erlaubte uns somit den zweiten hypothetischen Mechanismus isoliert zu erfassen und mit konventionellen Reizen zu vergleichen. Es wurden zwei senkrechte Sinusgitter von unterschiedlicher Ortsfrequenz getrennt auf beide Retinen projiziert, wobei die beiden Bilder in rascher Folge, 25 mal pro Sekunde, jeweils um denselben Betrag, maximal um eine Gitterperiode, gegeneinander verschoben wurden. Die Empfindung die ein derartiger Binokularreiz auslöste war ein um die senkrechte Achse gedrehtes Gitter, wobei die schnellen Bildverschiebungen zusätzliche Empfindungen auslösten, wie Flimmern oder Wandern der Gitterebene nach einer Seite. Jedoch die Empfindung einer schrägen Gitterebene war eindeutig: beide Gitter wurden fusioniert, solange der Frequenzunterschied beider Bilder gewisse Werte nicht überschritt.

Bei der Erfassung der Leistungsfähigkeit dieses zweiten Mechanismus wurde versucht, die Grenzen dieses stereoskopischen Grösseneffektes zu ermitteln. Dabei wurden durch den Standard, in 10 Grad Schritten, immer grössere Schrägen vorgegeben, bis zu Schrägen von 60 Grad (bzw. 70 Grad). Die Resultate zeigten bei zunehmender Schräge ein Abweichen von der theoretischen Kurve, im Sinne eines Steilerwerdens. Ein signifikanter Unterschied zwischen stationärem

Sinusgitter und "disparity-wobble" war nicht abzulesen. Eine weitere Aufgabe war unter "disparity-wobble" Bedingung, ohne vorgegebenen Standard, eine maximale Schräge der Figur einzustellen, also die maximale Grössendisparation zu suchen. Es wurden Werte bis zu 23 % erreicht. Dieselbe Aufgabe mit stationärem Sinusgitter erbrachte Werte bis nur 18 %. Bei diesem Binokularreiz zerfiel das Gitter in mehrere Teile ("break of fusion"), es wurden dann optisch kleinere Einheiten analysiert, wobei immer noch eine deutliche Empfindung von Schräge herrschte. So konnten Grössendisparationen vom doppelten Wert der Fusionsgrenz verwendet werden.

Der quantitative Vergleich der Schwellenwerte zeigte unter Bedingungen die Querdissparation aufwiesen durchwegs niedrigere Schwellenwerte (unter 1 %) als bei Ausschaltung der Querdissparation ("disparity-wobble") (unter 2 %). Diese beiden Werte sind jedoch sehr klein.

In der Validität kann eine grössere Abweichung vom theoretischen Wert (≈ 1) nicht gefunden werden. Die Resultate befanden sich in einem Bereich von 0,7 bis 1,07.

Wir haben gezeigt, dass auch unter Ausschluss der Querdissparation Schräge gesehen wird, und zwar auf der Basis eines binokularen Ortsfrequenzvergleichs im Sinne eines Vergleichs der räumlichen Orientierung zwischen beiden Augen. Demnach wird eine visuelle Information äusserst früh, d.h. bereits monokular verarbeitet und erst in einer weiteren Stufe mit der Gegenseite verglichen. Die Konsequenz ist, dass es binokulare Neurone gibt, die auf bestimmte Ortsfrequenzunterschiede beider Augen empfindlich sind.

VI. Literaturnachweis

- Barlow, H.B., C. Blakemore, J.D. Pettigrew (1967). The neural Mechanism of binocular discrimination. J. Physiol. 193, 327 - 342.
- Blakemore C. (1970). A new kind of stereoscopic vision. Vision Res. 10, 1181 - 1199.
- Green, J. (1889). On certain stereoscopical illusions evoked by prismatic and cylindrical spectacle-glasses. Trans. Amer. ophthal. Soc., 449 - 456.
- Hubel, D.H., T.N. Wiesel (1970). Cells sensitive to binocular depth in area 18 of the macaque monkey cortex. Nature, Lond. 225, 41 - 42.
- Julesz, B. (1971). Foundations of cyclopean perception. University of Chicago press, Chicago.
- Nikara, T., P.O. Bishop, J.D. Pettigrew (1968). Analysis of retinal correspondence by studying receptive fields of binocular single units in the cat striate cortex. Exptl. Brain Res. 6, 353 - 372.
- Ogle, K.N. (1962). The optical space sense. In: The eye (edited by Davson H.) Vol. IV. Academic press, New York.
- Poggio, G.F., B. Fischer (1977). Binocular interaction and depth sensitivity in striate and prestriate cortex of behaving rhesus monkey. J. Physiol. 40, 1392 - 1405.
- von der Heydt, R., C. Adorjani, P. Hännny, G. Baumgartner (1978) Disparity sensitivity and receptive field incongruity of units in the cat striate cortex. Exptl. Brain Res. 31, 523 - 545.

Wadsworth, O.F. (1876). On the effect of a cylindrical lens, with vertical axis placed before one eye.

Trans. Amer. ophthal. Soc., 342 - 344.

Wheatstone, Ch. (1838). Contributions to the physiology of vision. Phil. Trans. R. Soc. 11, 371.

Lebenslauf

Am 29. Mai 1946 wurde ich als Sohn des Kaufmann Robert Riederer und seiner Ehefrau Veronika, geb. Zumbach in Zürich geboren. Hier besuchte ich Primar - und Sekundarschule und absolvierte eine Lehre als Bauzeichner. Anschliessend begann ich mich an der Akademikergemeinschaft Zürich auf die eidgenössische C-Matura vorzubereiten, welche ich im Frühjahr 1971 bestand. Im Herbst 1971 begann ich das Medizinstudium an der Universität Lausanne und absolvierte dort das 1. und 2. Propädeutikum. Nach dem Wechsel an die Universität Zürich legte ich an dieser das 3. Propädeutikum sowie im Herbst 1978 das Staatsexamen mit Erfolg ab. Zur Zeit bin ich Assistenzarzt bei Prof. Dr. R.L. Friede, Neuropathologie Universitätsspital Zürich. Ich bin verheiratet und habe einen 2 - jährigen Sohn.

